

УДК 551.510

## Квазипериодическая сальтация в ветропесчаном потоке на опустыненной территории

Г.И. Горчаков, А.В. Карпов, Г.А. Кузнецов, Д.В. Бунтов\*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3*

Поступила в редакцию 20.01.2016 г.

Выполнено исследование механизма сальтации в ветропесчаном потоке на опустыненной территории по данным скоростной видеосъемки с использованием методов спектрального и вейвлетного анализа. Изучены особенности квазипериодических вариаций концентрации сальтирующих песчинок. Установлено, что узким полосам в спектре («спектральным линиям») плотности мощности флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок в диапазоне частот от 100 до 200 Гц соответствуют цуги (волновые пакеты) длительностью до 8–9 периодов. Предложено использовать длительность наблюдаемых цугов в качестве меры когерентности пульсаций скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы. Показано, что появление цугов квазипериодической изменчивости концентрации сальтирующих песчинок со средними частотами в диапазоне от 100 до 200 Гц объясняется взаимодействием порывов ветра с волновыми неоднородностями на подстилающей поверхности типа мелкой ряби. Образование цугов длительностью до 4–5 периодов можно объяснить с помощью модели струйно-импульсной сальтации.

*Ключевые слова:* опустынивание, ветропесчаный поток, механизм сальтации, концентрация сальтирующих песчинок, квазипериодические вариации концентрации, длительность цугов, мгновенная частота, струйная сальтация, когерентность пульсаций скорости ветра; desertification, windsand flux, saltation mechanism, saltating sand concentration, quasiperiodic variations of concentration, wave packet duration, instantaneous frequency, jet saltation, wind velocity pulsation coherence.

### Введение

Опустынивание относится к числу значимых процессов глобального изменения окружающей среды и климата [1]. Процессы опустынивания происходят на обширных аридных и полуаридных территориях во многих регионах земного шара [1–3]. Поэтому исследования процессов опустынивания представляют большой научный и практический интерес.

Определяющую роль в процессах опустынивания играет взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью. На песчаных опустыненных территориях при достаточно большой скорости ветра возникает ветропесчаный поток (песчаная поземка, которая при сильном ветре перерастает в песчаную бурю) [3, 4]. В ветропесчаном потоке основным процессом является сальтация [2–6] — скачкообразное перемещение огромного количества песчинок. Многочисленные исследования, выполненные преимущественно в лабораторных условиях (в ветровых каналах), показали, что интенсивность сальтации, которая во многих работах характеризуется величиной твердого расхода или проинтегрированным по высоте массовым потоком сальтации  $R$ ,

определяется, главным образом, средней скоростью ветра в приземном слое атмосферы [4] или динамической скоростью (скорость трения)  $u_*$  [2–6], являющейся одним из основных параметров турбулентности [7]. Предложено много эмпирических зависимостей  $R$  от  $u_*$ , которые заметно отличаются друг от друга [2, 6]. Проблема состоит в том, что на большом массиве данных при фиксированной скорости ветра, динамической скорости или «динамического числа Фруда» [3] твердый расход, массовый поток сальтации на заданной высоте и другие характеризующие интенсивность сальтации параметры могут изменяться на два десятичных порядка [5]. Отсюда следует, что на интенсивность сальтации помимо скорости ветра сильно влияют другие, пока не учитываемые параметры. Иными словами, механизм сальтации на опустыненных территориях до сих пор недостаточно изучен.

Давно замечено, что на перенос песчинок могут влиять разнообразные естественные и искусственные неоднородности на подстилающей поверхности, и в том числе волновые структуры на песчаной поверхности [3, 8], как, например, барханные гряды, квазипериодическая рябь с высотой неоднородностей порядка 1 см и мелкая рябь с высотой неоднородностей порядка 1 мм [3].

Наличием ряби на подстилающей поверхности объясняется, в частности, явление «струйной сальтации» [3], которая обнаруживается по появлению нескольких (до 4–5) отчетливо выделенных макси-

\* Геннадий Ильич Горчаков (gengor@ifaran.ru); Алексей Владимирович Карпов (karпов@ifaran.ru); Герман Алексеевич Кузнецов; Дмитрий Владимирович Бунтов.

мумов на вертикальных профилях концентрации и массового потока сальтирующих песчинок [3].

В работе [9] по исследованию механизма сальтации на опустыненной территории методом скоростной видеосъемки в Астраханской обл. было обнаружено явление квазипериодической («резонансной») сальтации, обусловленной, по-видимому, взаимодействием турбулентного потока (ветра) с волновыми неоднородностями на песчаной подстилающей поверхности, которые могут заметно влиять на взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью.

Целью настоящей статьи является детальный анализ квазипериодических флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненной территории по данным скоростной видеосъемки.

### Исследование вариаций концентрации сальтирующих песчинок методом скоростной видеосъемки

Скоростная видеосъемка процесса сальтации (с частотой 1200 Гц) выполнялась нами [9, 10] с помощью автоматической фотокамеры Casio Exilim EX-F1. По данным скоростной видеосъемки были восстановлены траектории сальтирующих песчинок, что позволило решить [9, 10] обратные задачи динамики сальтирующих песчинок, целью которых является нахождение аэродинамического диаметра и компонент скорости вылета с подстилающей поверхности сальтирующих песчинок, а также параметров, определяющих «мгновенные» вертикальные профили горизонтальной и вертикальной компонент скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы. Показано, что по восстановленным траекториям двух-трех синхронно сальтирующих песчинок с учетом эффекта Магнуса [6, 11] можно определить угловую скорость вращения песчинок. Обработка изображений на кадрах скоростной видеосъемки позволила с разрешением по высоте 2 мм построить вертикальный профиль счетной концентрации сальтирующих песчинок [9].

Были определены (в относительных единицах) для каждого кадра суммарные концентрации сальтирующих песчинок  $N$ . В данной статье используются результаты восстановления временной изменчивости концентрации сальтирующих песчинок по двум видеофильмам, полученным нами при наблюдении сальтации 16.08.2009 г. на опустыненной территории в Астраханской обл. в государственном заказнике «Пески Берли». Первый видеофильм длительностью 1,5 с (1800 кадров) получен в 15:18, а второй — длительностью 3,25 с (3900 кадров) — в 15:32. На рис. 1 представлена выборка  $N(t)$ , где  $t$  — время, из первого видеофильма длительностью 1,0 с. Значения концентрации  $N$  соответствуют числу наблюдаемых песчинок в кадре видеофильма. Нетрудно увидеть, что существенный вклад в временную изменчивость концентрации сальтирующих песчинок вносят высокочастотные флуктуации.

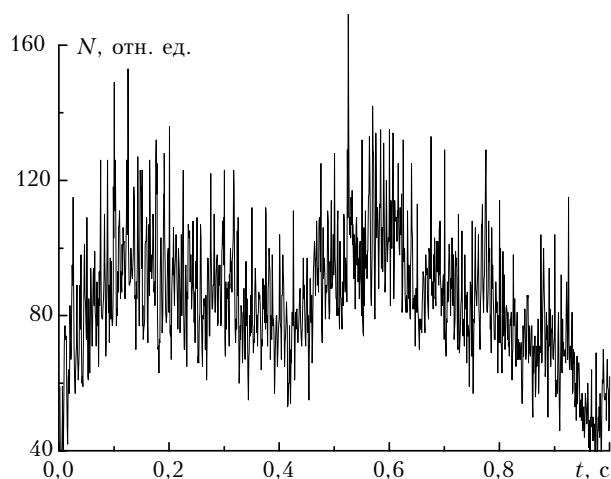


Рис. 1. Флуктуации концентрации сальтирующих песчинок по данным скоростной видеосъемки 16.08.2009 г. в 15:18 в заказнике «Пески Берли» (Астраханская обл.)

Анализ временной изменчивости концентрации сальтирующих песчинок  $N(t)$ , представленной на рис. 1, позволил выявить временные интервалы квазипериодической изменчивости концентрации. В качестве примера на рис. 2 показана часть вышеуказанной реализации  $N(t)$  длительностью 0,15 с, на которой в период времени от  $t_1$  до  $t_2$  наблюдается сравнительно длинный цуг квазипериодической изменчивости концентрации сальтирующих песчинок. Длительность таких цугов меняется в сравнительно широких пределах. В частности, на рис. 3 (кривая 1) представлена выборка  $N(t)$  длительностью 0,15 с из второго видеофильма. На этой выборке можно увидеть короткие цуги (I, II, III) квазипериодической изменчивости концентрации сальтирующих песчинок. Показанные на рис. 2 и 3 квазипериодические вариации концентрации песчинок зашумлены «высокочастотными» флуктуациями (частоты  $f > 200$  Гц) и искажены «низкочастотными» вариациями.

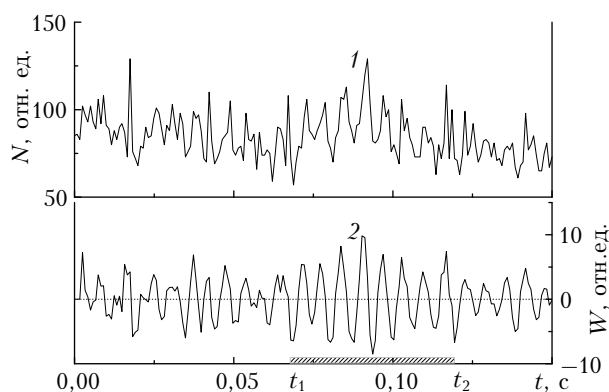


Рис. 2. Флуктуации концентрации (1) сальтирующих песчинок (выборка длительностью 0,15 с)  $N(t)$  и результат вейвлетной фильтрации  $W(t)$  (2) по данным скоростной видеосъемки 16.08.2009 г. в 15:18. Интервал времени от  $t_1$  до  $t_2$  соответствует началу и концу цуга квазипериодической изменчивости концентрации сальтирующих песчинок

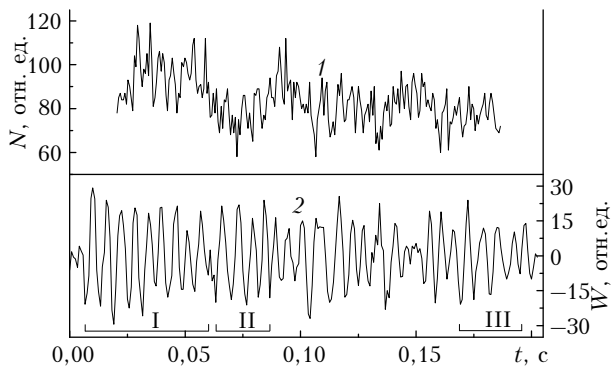


Рис. 3. Флуктуации концентрации ( $t$ ) сальтирующих песчинок (выборка длительностью 0,15 с)  $N(t)$  и результат вейвлетной фильтрации  $W(t)$  (2) по данным скоростной видеосъемки 16.08.2009 г. в 15:32 (I, II и III – цуги квазипериодических вариаций концентрации сальтирующих песчинок)

Количественные характеристики квазипериодической изменчивости  $N(t)$  можно получить, используя спектральный [12–14] и вейвлетный [15] анализы.

### Спектральный анализ флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок

Как следует из рис. 1–3, сальтация представляет собой случайный процесс с широким спектром флуктуаций. Полученные нами видеофильмы позволяют анализировать флуктуации концентрации сальтирующих песчинок в диапазоне примерно от 10 до 600 Гц. Спектральный анализ реализации  $N(t)$ , представленной на рис. 1, показал, что в спектре флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок  $S(f)$  [13] присутствует отчетливо выраженная мода в диапазоне частот от 100 до 200 Гц [9] с максимумом на частоте примерно 160 Гц. Указанная мода может быть обусловлена наличием цугов квазипериодической изменчивости (волновых пакетов) в наблюдаемой реализации  $N(t)$  (см. рис. 1), о чем свидетельствуют приведенные на рис. 2 и 3 примеры.

Следует отметить, что явление квазипериодической изменчивости концентрации сальтирующих песчинок на пустынных территориях было обнаружено в наших полевых экспериментах [9].

Анализ опубликованных описаний лабораторных экспериментов позволил найти описание похожего эффекта в работе [11]. Указанный эксперимент был выполнен с использованием специально приготовленных частиц с разными размерами. При сальтации частиц с размерами меньше 53 мкм иногда наблюдались квазипериодические вариации концентрации частиц. Авторам [11] не удалось объяснить этот эффект и найти упоминания о нем в литературе.

Нами была рассчитана спектральная плотность мощности флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок в представлении  $P(f) = fS(f)$ , которое позволяет оценивать вклады в суммарную дисперсию вариаций различных диапазонов частот [14], для двух вышеуказанных видеофильмов.

На рис. 4 представлен спектр  $P(f)$  для реализации из первого видеофильма длительностью 1,5 с. На этом спектре отчетливо выделяется мода в диапазоне частот примерно от 100 до 200 Гц, которая характеризует основные квазипериодические флуктуации концентрации сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке. Заметно слабее выражены флуктуации  $N$  в диапазоне частот 10–100 Гц.

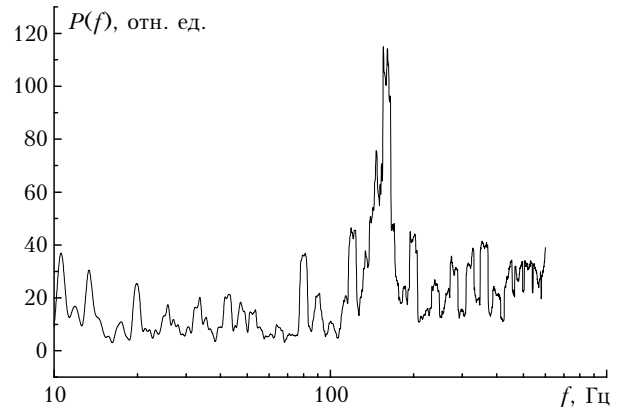


Рис. 4. Зависимость от частоты  $P(f) = fS(f)$ , где спектр  $S(f)$  рассчитан по данным скоростной видеосъемки 16.08.2009 г. в 15:18 в заказнике «Пески Берли»

Для второго видеофильма (видеосъемка этого фильма выполнялась в другой точке пустынной территории) показан несглаженный спектр плотности мощности флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок (рис. 5).

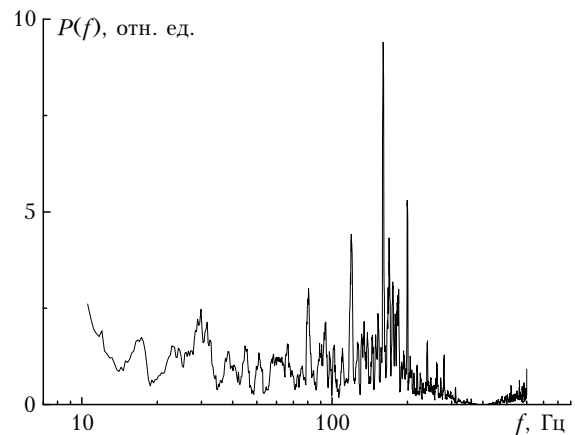


Рис. 5. Зависимость  $P(f) = fS(f)$  от частоты, где спектр  $S(f)$  рассчитан по данным скоростной видеосъемки 16.08.2009 г. в 15:32 в заказнике «Пески Берли»

Максимальная плотность мощности флуктуаций, как и в предыдущем случае, достигается в диапазоне частот 100–200 Гц. Видно, что эта мода состоит из отдельных узких «спектральных линий», которым, как показал анализ, соответствуют определенные цуги квазипериодической изменчивости  $N$ . В отличие от первой реализации заметный вклад в суммарную дисперсию флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок вносит область спектра от

10 до 100 Гц, включая моду с максимумом вблизи 30 Гц и «спектральную линию» на частоте 80 Гц.

Таким образом, спектральный анализ  $N(t)$  свидетельствует, во-первых, о том, что основной вклад в квазипериодическую изменчивость концентрации сальтирующих песчинок вносит мода спектра, расположенная в диапазоне частот 100–200 Гц, во-вторых, о том, что структура этой моды формируется набором узких линий, которые можно отождествить с содержащимися в  $N(t)$  цугами квазипериодической изменчивости концентрации.

Задача выделения отдельных цугов квазипериодической изменчивости  $N(t)$  может быть успешно решена методом вейвлетного анализа.

### Вейвлетный анализ квазипериодических вариаций интенсивности сальтации

Вейвлетный анализ [15] позволяет выявлять квазипериодические вариации в нестационарных процессах. В частности, вейвлетный анализ можно использовать для диагностики цугов (волновых пакетов) и количественной характеристики квазипериодических вариаций концентрации сальтирующих песчинок.

В данной работе с учетом результатов спектрального анализа осуществлена вейвлетная фильтрация наблюдаемых (см. рис. 1–3) временных зависимостей  $N(t)$ . В частности, был использован вейвлет ФНАТ [15], который показан на рис. 6 ( $\psi = 1$ , если  $|t| \leq \frac{1}{3}$ ;  $\psi = -\frac{1}{2}$ , если  $\frac{1}{3} < |t| \leq 1$ ;  $\psi = 0$ , если  $|t| > 1$ ).

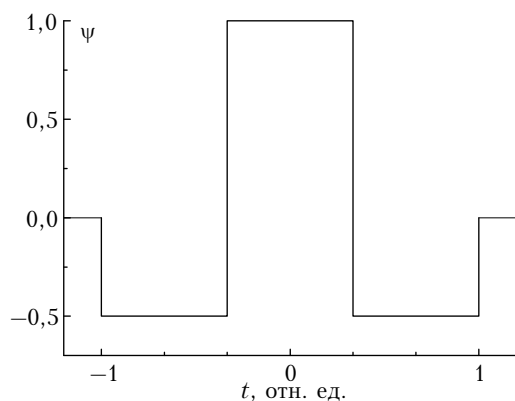


Рис. 6. Форма вейвлета ФНАТ

На рис. 2 и 3 представлены результаты вейвлетной фильтрации (кривые 2) для соответствующих выборок  $N(t)$  (кривые 1) с использованием вейвлета ФНАТ, масштаб которого соответствует частоте  $f_0 = 150$  Гц. Указанный вейвлет подавляет «высокочастотные» шумы ( $f \geq 200$  Гц) и ослабляет низкочастотные вариации  $N(t)$  ( $f \leq 100$  Гц), практически не искажая квазипериодические вариации концентрации сальтирующих песчинок в диапазоне частот от 100 до 200 Гц. В частности, на зависимость

$W(t)$ , представленной на рис. 3 (кривая 2), выделено три коротких цуга (I, II и III), для которых «мгновенные» частоты [12] примерно равны 170, 165 и 150 Гц соответственно. Пример длинного цуга (8 периодов) квазипериодической изменчивости  $N(t)$  показан на рис. 2 (кривая 2) для периода времени от  $t_1$  до  $t_2$ . Мгновенная частота для этого цуга примерно равна 155 Гц. В целом на наблюдаемых зависимостях  $W(t)$  длина цугов варьирует от 3–4 до 8–9 периодов, а мгновенные частоты для рассмотренных цугов, как правило, попадают в спектральный диапазон от 100 до 200 Гц. Здесь дана оценка длины цугов снизу, поскольку амплитуда вариаций  $N(t)$  и длительность отдельных периодов в ряде случаев меняется.

Следует вспомнить, что А.А. Харкевич [12] для анализа сигналов предлагал использовать колоколообразный импульс, промодулированный синусоидой, что, по существу, представляет собой вейвлет Морле [15].

### Обсуждение результатов

На интенсивность сальтации на опустыненных территориях помимо скорости ветра могут влиять неоднородности на подстилающей поверхности [3, 8], включая макроформы (дюны, барханы) и микроформы: рифели или рябь (высота порядка 1 см) и мелкая рябь (высота порядка 1 мм). На опустыненных территориях часто образуются волновые или квазипериодические неоднородности на подстилающей поверхности, в том числе барханные гряды и квазипериодическая рябь [8]. Очевидно, что взаимодействие турбулентного потока (ветра) с волновыми микроформами на песчаной подстилающей поверхности может быть причиной возникновения квазипериодической изменчивости концентрации сальтирующих песчинок. Волновые неоднородности возникают также на дне водоемов [8].

Для всех перечисленных выше волновых неоднородностей на песчаной поверхности отношение («крутизна» [5]) высоты неоднородности  $h$  к длине волны  $\lambda$ , т.е. к расстоянию между вершинами (гребнями) как соседних барханов, так и рифелей, меняется в сравнительно узких пределах (0,05–0,06 для барханов и 0,06–0,08 для рифелей [3]).

О.Е. Семеновым [3] показано, что наличие квазипериодических рифелей влияет на режим сальтации. Он обнаружил явление «струйной» сальтации, благодаря которой на вертикальном профиле концентрации сальтирующих песчинок появляется несколько максимумов (до 4–5), которые создаются потоками песчинок с рифелей (барханчиков), примыкающих к плоскости наблюдения. Поэтому можно предполагать, что потоки сальтирующих песчинок в рассматриваемом случае поднимаются с определенных узких участков волновых неоднородностей (по-видимому, с гребней). На рис. 7 представлена предложенная нами монотраекторная модель струйной сальтации, которая соответствует данным наблюдений О.Е. Семенова. Если расстояния в плоскости наблюдения между струями с соседних барханчиков сравнительно невелики

и вклады этих барханчиков хорошо различимы, то с удалением барханчиков (рифелей) от плоскости наблюдения струи сближаются. Благодаря неизбежному размыву струй с удаленных барханчиков они перекрываются и становятся неразличимыми. Поэтому удается идентифицировать струи только от ближайших 4–5 рифелей [3].

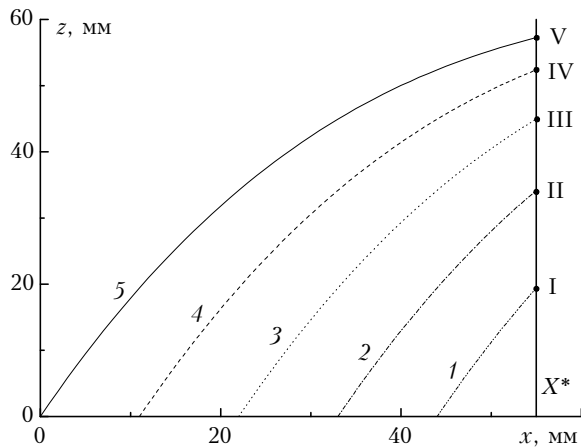


Рис. 7. Монотраекторная модель струйной сальтации: 1–5 — потоки сальтирующих песчинок с ближайших к плоскости наблюдения  $X^*$  гребней рифелей волновой структуры на песчаной поверхности; I–V — уровни пересечения указанных потоков с плоскостью наблюдения

Характерные для струйной сальтации профили получены О.Е. Семеновым [3] при сравнительно большом временном осреднении. Если предположить теперь, что сальтация обусловлена короткими (порядка миллисекунд) порывами ветра, то возможен режим импульсной струйной сальтации, что приведет к появлению цугов длительностью до 4–5 периодов на зависимости  $N(t)$ .

В [3] представлены результаты измерений вертикальных профилей средней скорости ветра над рифелями. В слое толщиной несколько миллиметров средняя скорость ветра  $V$  примерно равна 3 м/с. С учетом отставания песчинок от воздушного потока [3] средняя скорость песчинок в этом слое  $V_s = k_s V$ , где  $k_s$  — коэффициент скольжения [3]. Поскольку в рассматриваемом случае  $k_s \approx 0,6$  [3], то  $V_s \approx 1,8$  м/с. Расстояние  $\lambda$  между вершинами соседних рифелей песчинка пролетает за время  $\tau_s = \lambda/V_s$ . Соответственно, частота модуляции концентрации сальтирующих песчинок при струйной импульсной сальтации  $f_s = V_s/\lambda$ . Принимая значение  $f_s = 150$  Гц [9] и учитывая, что  $V_s \approx 1,8$  м/с, получим оценку масштаба периодичности волновой структуры  $\lambda = 12$  мм. Поскольку для рифелей отношение  $h/\lambda$  варьирует в пределах от 0,06 до 0,08, то высота неоднородностей будет равна 0,72–0,96 мм, т.е. 1 мм по порядку величины, что характерно для мелкой ряби.

Квазипериодическим вариациям  $N(t)$  с частотой 30 Гц (см. рис. 5) соответствуют волновые структуры с шагом периодичности  $\lambda$ , примерно равным 6 см, и высотой 4–5 мм, что по порядку величины соответствует обычной ряби на песчаной поверхно-

сти опустыненных территорий. Модель мгновенной струйной сальтации не способна объяснить наличие длинных цугов в вариациях концентрации сальтирующих песчинок.

В прикладных задачах физики атмосферы давно учитывается образование вихрей за препятствиями [16], которые, в частности, влияют на перенос снега в приземном слое атмосферы. Darwin [17] обнаружил перемещение песчинок навстречу потоку за песчаными рифелями, обусловленное образованием маломасштабных вихрей вблизи поверхности. Очевидно, что при наличии волновых неоднородностей типа ряби и мелкой ряби в приповерхностном слое атмосферы возникают когерентные вихревые структуры. Об этом, в частности, свидетельствуют обнаруженные О.Е. Семеновым [3] в приповерхностном слое атмосферы при наличии волновых структур типа ряби заметные отличия вертикальных профилей скорости ветра над различными участками рифелей (гребень, впадина и др.).

В [18] показано, что системы квазипериодических циркуляционных ячеек, образующихся в приземном слое атмосферы при обтекании неоднородно нагретых волнистых поверхностей типа барханных гряд, воздействуют на среднее течение.

В ряде задач гидродинамики (см., например, [19]) мгновенную скорость ветра  $u(t)$  представляют в виде суммы средней скорости  $\bar{u}$ , когерентной составляющей  $\tilde{u}(t)$  и случайной составляющей  $u'(t)$ :  $u(t) = \bar{u} + \tilde{u}(t) + u'(t)$ . Учитывая сильное влияние скорости ветра на интенсивность сальтации, можно предположить, что наблюдаемые на опустыненной территории квазипериодические вариации концентрации сальтирующих песчинок тесно связаны с когерентными вихревыми структурами, образующимися при взаимодействии ветра с волновыми неоднородностями на подстилающей поверхности. В частности, в качестве меры когерентности пульсаций  $\tilde{u}(t)$  можно использовать длительность цугов квазипериодической изменчивости  $N(t)$ , характеризуемую числом периодов в цуге (волновом пакете). Следует отметить, что вариации мгновенной частоты цугов в диапазоне 100–200 Гц можно объяснить вариациями скорости ветра в порывах, возникающих в приповерхностном слое атмосферы.

Явление квазипериодической изменчивости концентрации сальтирующих песчинок на опустыненной территории свидетельствует о том, что образующиеся на песчаной поверхности волновые неоднородности типа ряби и мелкой ряби заметно влияют на процесс сальтации и, в частности, на вариации интенсивности сальтации, что согласуется с результатами исследований О.Е. Семенова [3].

## Заключение

Проанализирована квазипериодическая изменчивость восстановленной по данным скоростной видеосъемки концентрации сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненной территории.

Показано, что определяющий вклад в суммарную дисперсию флуктуаций концентрации сальтирующих песчинок вносит отчетливо выраженная

мода в диапазоне частот примерно от 100 до 200 Гц. Обнаружены также квазипериодические вариации концентрации песчинок в диапазоне частот от 10 до 100 Гц.

Детальный анализ реализаций временной изменчивости концентрации сальтирующих песчинок показал, что они содержат цуги различной длительности (от 3–4 до 8–9 периодов), которые можно аппроксимировать, в первом приближении, отрезками синусоид.

С использованием вейвлетной фильтрации определены длительности цугов и оценены их эффективные частоты (периоды вариаций). Установлено, что длительность цугов может достигать 8–9 периодов, а эффективные (мгновенные) частоты цугов находятся, главным образом, в диапазоне 100–200 Гц.

Построена простейшая монотраекторная модель струйной сальтации, наблюдаемой при наличии волновых структур типа ряби и мелкой ряби на песчаной поверхности опустыненных территорий.

С учетом отставания песчинок от воздушного потока оценены масштаб и высота квазипериодических неоднородностей на подстилающей поверхности. Квазипериодические вариации концентрации сальтирующих песчинок в диапазоне частот от 100 до 200 Гц соответствуют волновым структурам типа мелкой ряби. Указано, что явление струйной сальтации не позволяет объяснить существование квазипериодических вариаций концентрации сальтирующих песчинок с длинными цугами (больше 4–5 периодов).

Выдвинута гипотеза о том, что длинные цуги квазипериодических вариаций концентрации сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненных территориях обусловлены воздействием на подстилающую поверхность когерентной составляющей скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы, возникающей при взаимодействии турбулентного потока с волновыми структурами на песчаной подстилающей поверхности типа ряби и мелкой ряби.

Предложено использовать выраженную в периодах длительность цугов квазипериодической изменчивости концентрации сальтирующих песчинок как меру степени когерентности пульсаций скорости ветра в приповерхностном слое атмосферы на опустыненных территориях.

Результаты выполненного исследования свидетельствуют о том, что при оценке интенсивности сальтации необходимо учитывать наличие неоднородностей типа ряби и мелкой ряби на подстилающей поверхности.

Авторы благодарят О.Г. Чхетиани за полезные обсуждения.

*G.I. Gorchakov, A.V. Karpov, G.A. Kuznetsov, D.V. Buntov. Quasiperiodic saltation in the windsand flux over desertified area.*

Saltation mechanism investigation in the windsand flux over the desertified area has been carried out on fast video recording data using spectral and wavelet analysis. Quasiperiodic variation peculiarities of the saltating sand concentration are studied. It is established that narrow bands in spectrum ("spectral lines") of saltating sand concentration fluctuation density power in the range from 100 to 200 Hz are consistent with wave packets, which duration achieves 8–9 periods. It is suggested to use the duration of the wave packets observed as a measure of a pulsation coherence of the wind velocity in a near surface layer of the atmosphere. It is shown that quasiperiodic variability saltating sand concentration appearance is explained by interaction of the wind gusts with wave irregularities on the underlying surface type of fine ripples. The wave packet formation with duration to 4–5 periods can be explained using the model of jet-pulse saltation.

Работа поддержана РФФИ (проект № 14-05-00523).

1. *Золотокрылин А.Н.* Климатическое опустынивание. М.: Наука, 2003. 248 с.
2. *Zheng X.* Mechanics of Wind Blown Sand Movements. Berlin: Springer, 2009. 290 p.
3. *Семенов О.Е.* Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы: КазНИИЭК, 2011. 580 с.
4. *Bagnold R.A.* The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen, 1941. 265 p.
5. *Бютнер Э.К.* Динамика приповерхностного слоя воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 158 с.
6. *Shao J.* Physics and Modeling of Wind Erosion. N.Y.: Springer, 2000. 393 p.
7. *Обухов А.М.* Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1994. 440 с.
8. *Шуляк Б.А.* Физика волн на поверхности сыпучей среды и жидкости. М.: Наука, 1971. 400 с.
9. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Злобин И.А., Бунтов Д.В., Соколов А.В.* Исследование динамики сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Докл. АН. 2013. Т. 452, № 6. С. 669–676.
10. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Соколов А.В., Бунтов Д.В., Злобин И.А.* Экспериментальное и теоретическое исследование траекторий сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 501–506; *Gorchakov G.I., Karpov A.V., Sokolov A.V., Buntov D.V., Zlobin I.A.* Experimental and theoretical study of the trajectories of saltating sand particles over desert areas // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 6. P. 423–428.
11. *White B.R., Schulz J.C.* Magnus effect in saltation // J. Fluid. Mech. 1977. V. 81, N 3. P. 495–512.
12. *Харкевич А.А.* Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962. 236 с.
13. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 542 с.
14. *Ламли Дж., Пановский Г.А.* Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
15. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.
16. *Хржан А.Х.* Физика атмосферы. М.: Физматгиз, 1958. 476 с.
17. *Darwin G.H.* On the Formation of Ripple-Mark in Sand // Proc. Roy. Soc. London. 1883. V. 36, N 228. P. 18–43.
18. *Чхетиани О.Г., Калашник М.В., Ингель Л.Х.* Генерация «теплого ветра» над неоднородной нагретой волнистой поверхностью // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2013. Т. 49, № 2. С. 137–143.
19. *Гаврилов А.А., Дектярев А.А., Сентябов А.В.* Моделирование закрученных течений с когерентными структурами с помощью нестационарной модели переноса рейнольдсовых напряжений // Изв. РАН. Мех. жидкости и газа. 2015. № 4. С. 11–24.